



Ou sont passes les trous noirs primordiaux ?

A. Barrau, G. Boudoul

► To cite this version:

A. Barrau, G. Boudoul. Ou sont passes les trous noirs primordiaux?. La Recherche, 2003, 362, pp.38-43. in2p3-00013715

HAL Id: in2p3-00013715

<https://hal.in2p3.fr/in2p3-00013715>

Submitted on 27 Feb 2003

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

■ **EN DEUX MOTS** ■ Des trous noirs aussi petits que le noyau d'un atome, mais aussi lourds qu'une montagne pourraient avoir été créés dans les premières phases de l'Univers. Dans les années soixante-

dix, l'Anglais Stephen Hawking avait démontré que, s'ils existaient, ils pourraient s'évaporer en dégageant une énergie observable. La quête a pour l'instant été vaine, mais des pistes sont encore à explo-

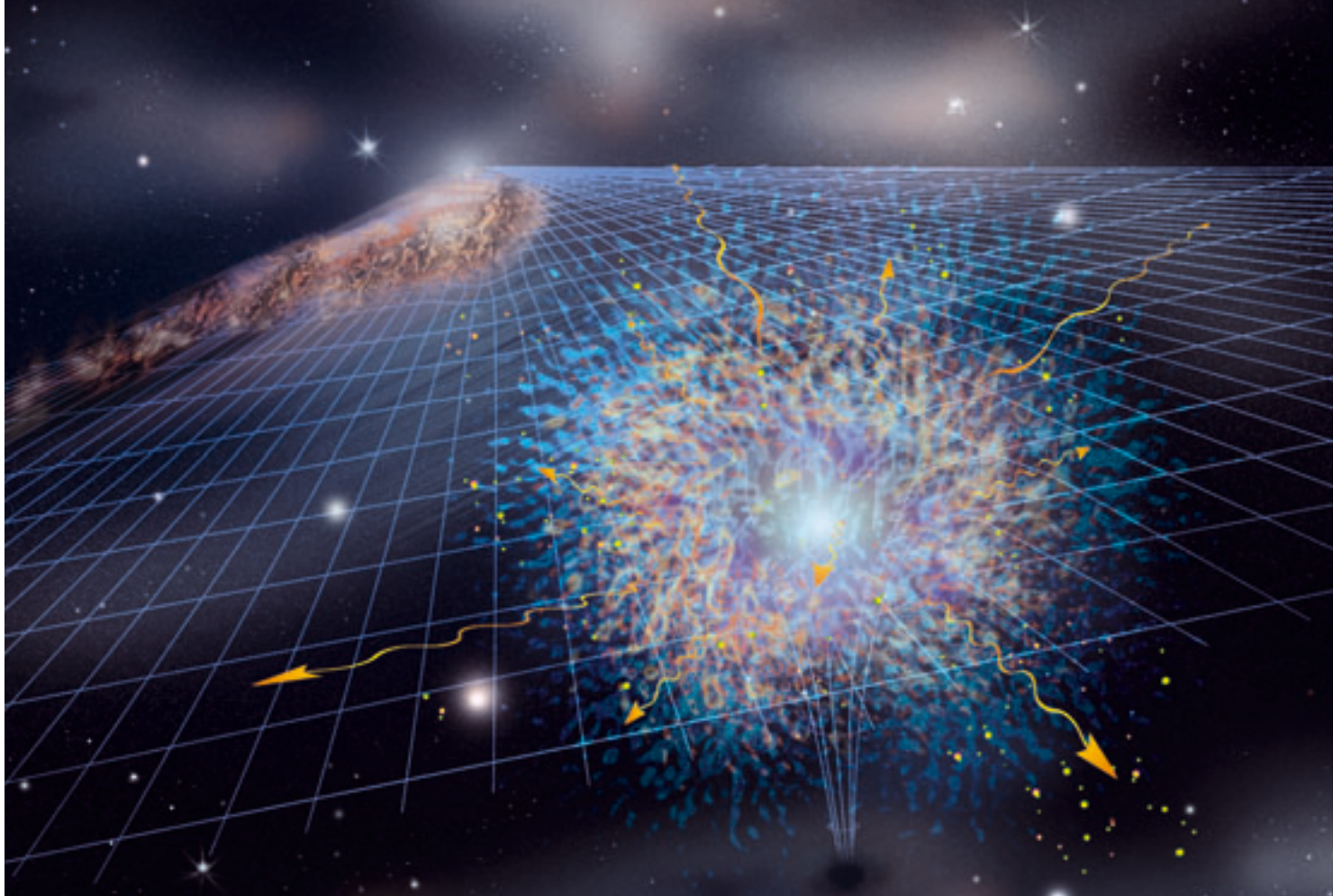
rer. Les physiciens tentent de les débusquer en détectant des particules d'antimatière, des rayons gamma, ou même espèrent en créer de nouveaux à l'intérieur des futurs accélérateurs de particules.



Aurélien Barrau
et **Gaëlle Boudoul**
sont chercheurs à l'Institut
des sciences nucléaires
de Grenoble
(CNRS/université
Joseph-Fourier).

© KLIMAN.COM

L'existence de minuscules trous noirs, créés dans les premières phases de l'Univers, est théoriquement possible. Ces petits monstres pourraient encore perdre de l'énergie et être donc détectables. Mais, jusqu'à présent, toutes les expériences se sont soldées par un échec. Les physiciens sont toujours optimistes : puisqu'ils les ont pensés, pourquoi n'existeraient-ils pas ?



LES TROUS NOIRS ÉMETTENT UN RAYONNEMENT, contrairement aux idées reçues. Encore faudrait-il pouvoir l'observer ! © « PRIMORDIAL BLACK HOLE » COPYRIGHT 2000
AUORE SIMONNET www.imaginearts.com/simonnet et <http://lepo.sonoma.edu>

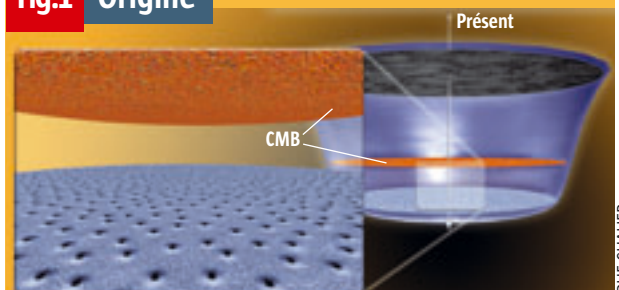
Les trous noirs sont partout : au cœur des galaxies, comme la Voie lactée où un monstre 2,6 millions de fois plus massif que le Soleil semble tapi. D'autres, d'une masse de « seulement » quelques dizaines de fois celle du Soleil*, sont des résidus d'étoiles ayant succombé à la gravitation à l'issue de l'explosion qui ponctue leur vie. Certains seraient même de taille intermédiaire (lire aussi p. 8). Il faut se rendre à l'évidence : les trous noirs ne sont plus uniquement des objets conceptuels. Ce ne sont plus seulement des solutions originales et élégantes aux équations d'Einstein décrivant la théorie de la relativité générale. Depuis plus de quarante ans, l'astronomie moderne a donné de solides bases à l'existence de ces astres étranges. Mais il pourrait aussi exister des entités astrophysiques singulières et plus fascinantes encore : les trous noirs primordiaux. Ceux-ci seraient, pour l'essentiel, beaucoup plus petits et, surtout, rayonneraient très intensément en s'évaporant de plus en plus rapidement ! De nombreux physiciens envisagent sérieusement l'existence de ces objets d'une incroyable densité, plus petits qu'un noyau atomique mais plus lourds qu'une montagne. Comme ils ne sont pas assez massifs, leur formation requerrait d'autres mécanismes que les phénomènes habituels d'effondrement gravitationnel, valables pour les autres types de trous noirs. Ces trous noirs microscopiques résulteraient de fluctuations présentes dans l'Univers, alors que celui-ci avait moins de 1 milliardième de milliardième de seconde [fig. 1]. Leur masse pourrait, dans les cas extrêmes, être aussi

petite que la masse de Planck, soit quelques centièmes de milligramme seulement.

Ces objets pourraient ainsi servir de sondes exceptionnelles pour percer les propriétés du Cosmos à ces temps extrêmement reculés, et sur des échelles de distances particulièrement faibles. Ils constitueraient des vestiges inestimables révélant l'Univers primordial à des tailles et à des temps inaccessibles aux observations habituelles de la cosmologie. Ce lien entre les modèles théoriques et la production de petits trous noirs est aujourd'hui un sujet brûlant, à l'intersection de branches très variées de la physique : gravitation, mécanique quantique, physique statistique et théorie des champs. Les controverses sont nombreuses, et les différentes approches du phénomène donnent actuellement lieu à des publications, souvent contradictoires, très riches et variées. Mais personne n'a encore vu ces petits trous noirs... Leur détection directe serait pourtant théoriquement pos- ➔

* La masse du Soleil est égale à $2 \cdot 10^{30}$ kg.

Fig.1 Origine



LES TROUS NOIRS PRIMORDIAUX SE SONT FORMÉS à l'issue de la phase d'inflation (10^{-35} seconde après le Big Bang), qui se caractérise par une augmentation extrêmement importante du facteur d'échelle de l'Univers, bien avant l'émission du bruit de fond cosmologique (CMB).

© INFOGRAPHIE : CHRISTOPHE CHALIER

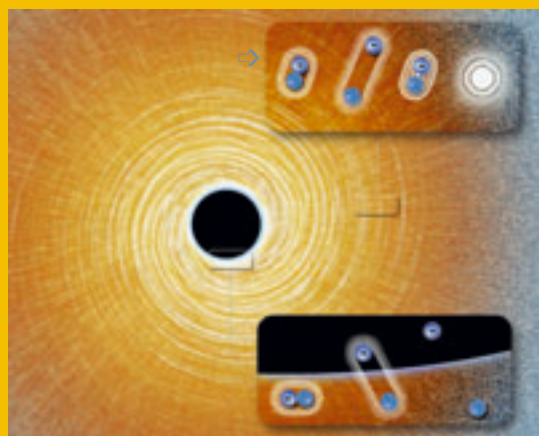
Fig.2 Évaporation



DES PAIRES PARTICULE-ANTIPARTICULE SE CRÉENT AUTOUR D'UN TROU NOIR.

Certaines disparaissent en s'annihilant (ci-contre en haut), d'autres sont « brisées ». L'un des membres du couple peut alors s'échapper suivant le phénomène de Hawking, tandis que l'autre tombe dans le trou noir (en bas).

© INFOGRAPHIE CI-CONTRE : CHRISTOPHE CHALIER. ILLUSTRATION CI-DESSUS : EXTRAITE DE L'UNIVERS DANS UNE COQUILLE DE NOIX DE STEPHEN HAWKING.



* **Le principe d'incertitude de Heisenberg** stipule qu'on peut violer la conservation de l'énergie pendant un temps très bref, inversement proportionnel à l'énergie extraite.

* **L'horizon d'un trou noir** est la distance en dessous de laquelle rien ne peut ressortir, pas même la lumière.

⇒ sible, malgré l'idée très répandue que rien ne peut s'échapper d'un trou noir, pas même la lumière. Dans les années soixante-dix, l'Anglais Stephen Hawking a modélisé un étrange mécanisme : l'évaporation. Il s'est appuyé sur les travaux des physiciens russes Yakov Zeldovitch et Alexandre Starobinsky, qui avaient montré, à la surprise générale, que les trous noirs en rotation devraient émettre des particules. En formulant ce phénomène en termes mathématiques rigoureux, S. Hawking est parvenu à la conclusion que tous les trous noirs doivent rayonner, même s'ils ne tournent pas [1] ! Ce paradoxe apparent trouve une interprétation intuitive quand on tient compte des fluctuations quantiques qui peuplent l'espace : le vide n'est pas réellement vide. Il est rempli de très nombreuses et fugaces particules virtuelles. Le principe d'incertitude de Heisenberg* autorise en effet la création, et l'annihilation, de paires de corpuscules de matière et d'antimatière qui peuvent être de toutes natures. Ceux-ci, et c'est pourquoi ils sont virtuels, sont habituellement destinés à s'annihiler rapidement l'un avec l'autre. Mais ici, au bord d'un trou noir, à l'instar des forces de marées de la Lune et du Soleil qui déforment les océans terrestres, l'attraction gravitationnelle intense peut casser la paire particule/antiparticule. L'une peut ainsi tomber au-delà de l'horizon* de

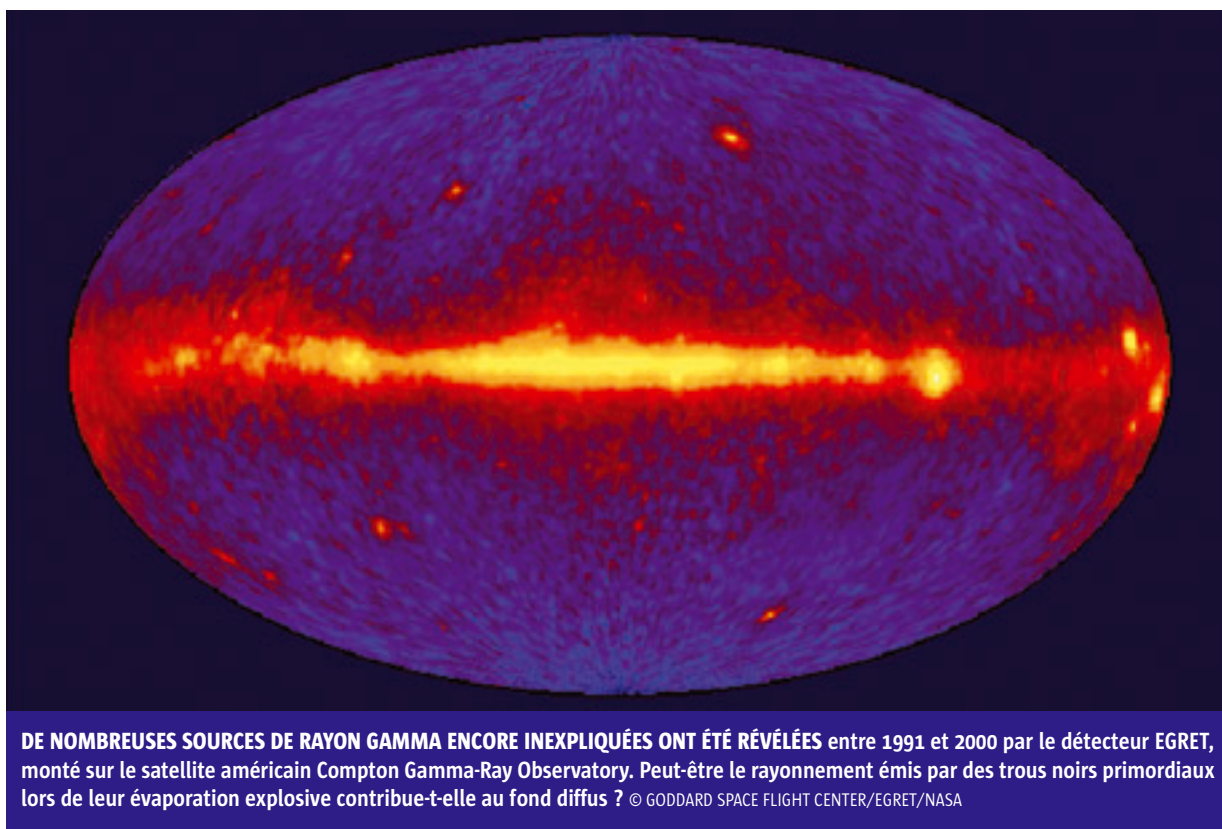
l'astre hyperdense, alors que sa partenaire s'échappe en emportant de l'énergie gravitationnelle du trou noir et devient réelle [fig. 2]. Le trou noir, quant à lui, perd de la masse : il s'évapore.

Selon S. Hawking, cette évaporation est caractérisée par une température* dont la définition est jugée particulièrement élégante pour les physiciens : elle réunit l'ensemble des constantes fondamentales de la physique et montre la proportionnalité inverse entre la masse et la température d'un trou noir. La valeur de cette température gouverne non seulement le comportement quantitatif, mais aussi qualitatif, des particules émises : plus le trou noir est chaud, plus il peut produire des particules de masses élevées. De plus, l'évaporation s'accélère : plus les trous noirs deviennent légers, plus ils s'évaporent vite, plus leur température est élevée, et plus les énergies des corpuscules émis deviennent importantes ! Selon la loi de Hawking, le processus s'emballe jusqu'à faire disparaître le trou noir, à mesure que la masse diminue et que la température augmente. Ce dernier point est l'enjeu de nombreux débats, et certaines approches spéculatives, dites Dilaton-Gauss-Bonnet*, s'opposent à cette vision en suggérant l'existence de reliques stables à l'issue de l'évaporation. Quoi qu'il en soit, la disparition demande d'autant plus de temps que la masse du trou noir est élevée.

Une détection possible

Il faudrait déjà mille fois l'âge de l'Univers pour que s'évapore un trou noir de 10 milliards de tonnes ne représentant pourtant que la masse d'une large montagne. Inutile de discuter des trous noirs stellaires, et encore moins des trous noirs supermassifs siégeant au cœur des galaxies actives : leur temps d'évaporation peut être considéré comme infini. En revanche, l'évaporation complète d'un trou noir de 1 000 tonnes ne prendrait qu'une seconde environ. À la différence de ses gros congénères, une mesure directe de son existence est envisageable : ce petit trou noir émettrait un rayonnement cosmique observable. L'enjeu est considérable, puisqu'il s'agit de découvrir simultanément des objets physiques extrêmes, mais aussi des reliques de l'Univers dans son plus jeune âge. Parmi les particules émises par ces trous noirs primordiaux, certaines d'entre elles sont particulièrement adaptées à la recherche de ces hypothétiques monstres : en premier lieu, les photons gamma dont l'énergie avoisine le centième de gigaélectronvolt (GeV*), en particulier parce que le Cosmos est extraordinairement transparent à ces énergies. Ces photons permettent donc de sonder des volumes considérables sans que des phénomènes d'interaction avec le milieu intergalactique ne puissent dégrader les caractéristiques initiales de l'émission.

Pour évaluer le flux de photons gamma émis par l'éventuelle présence de trous noirs primordiaux dans l'Univers, il faut d'abord calculer l'émission individuelle d'un de ces objets pour une masse (et donc une température) donnée.



DE NOMBREUSES SOURCES DE RAYON GAMMA ENCORE INEXPLIQUÉES ONT ÉTÉ RÉVÉLÉES entre 1991 et 2000 par le détecteur EGRET, monté sur le satellite américain Compton Gamma-Ray Observatory. Peut-être le rayonnement émis par des trous noirs primordiaux lors de leur évaporation explosive contribue-t-elle au fond diffus ? © GODDARD SPACE FLIGHT CENTER/EGRET/NASA

Cette émission provient à la fois de l'évaporation directe sous forme de rayonnement électromagnétique de grande énergie, mais aussi de la désintégration de certaines particules instables émises très abondamment (en l'occurrence les pions* neutres). Il faut ensuite tenir compte de la répartition en masse des trous noirs primordiaux : ceux de certaines masses sont-ils plus nombreux que les autres ? Ce dernier point est délicat puisqu'il requiert un modèle de formation des trous noirs. La plupart des chercheurs supposent connue la distribution des fluctuations dans l'Univers primordial, ce qui permet d'évaluer, en fonction de la masse de celles-ci, le nombre de régions où la densité permet la formation d'un trou noir. Il en résulte que les plus légers doivent être les plus nombreux, et de très loin ! Connaissant la loi de Hawking, c'est-à-dire le comportement lors de l'évaporation, il est alors possible d'évaluer la répartition en masse des petits trous noirs et de la combiner avec l'émission individuelle. Enfin, l'expansion de l'Univers induisant, de façon analogue à l'effet Doppler, un décalage spectral des rayonnements, il faut tenir compte de ce que les photons émis à une certaine énergie seraient aujourd'hui reçus à une énergie plus basse.

Des rayons gamma...

L'ensemble de ces processus permet d'évaluer un flux expérimentalement attendu, qui peut être comparé aux mesures obtenues par les satellites de détection gamma et, au premier rang d'entre eux, le Compton Gamma-Ray

Observatory et son détecteur EGRET. Dans les années quatre-vingt-dix, celui-ci a permis de dresser la première carte précise du ciel à haute énergie (voir photo ci-dessus). Il a en particulier mesuré le fond diffus gamma d'origine extragalactique. C'est lui qui permet d'accéder à la distribution des trous noirs primordiaux. L'absence d'excès notable autour de 0,1 GeV a donné une limite supérieure sur leur quantité. Elle est de l'ordre du dix milliardième de celle de l'Univers : ces mini-trous noirs ne représentent donc, au mieux, qu'une très petite partie de la masse totale [2]. Et pourtant cette valeur permet déjà d'obtenir des informations très importantes sur l'état primordial du Cosmos. Elle exclut en particulier un trop grand nombre de fluctuations de densité de petites tailles, puisque ce sont elles qui devraient engendrer des trous noirs microscopiques.

Parmi les espoirs déçus, il y eut les sursauts gamma, ces bouffées de rayonnement de très haute énergie distribuées uniformément sur la voûte céleste. Certains y virent même la preuve de l'existence des trous noirs primordiaux. Mais l'hypothèse est aujourd'hui à raison tombée en désuétude, compte tenu de la trop grande énergie dégagée lors de ces sursauts et de l'apparition de modèles plus simples pour les expliquer [3]. Il a donc fallu chercher ailleurs. Par exemple, vers les particules chargées que les petits trous noirs peuvent aussi émettre lorsque leur masse est faible et leur température élevée. Ces particules contribuent alors au rayonnement cosmique qui sillonne l'espace inter-

* La température d'un trou noir est donnée par $T = \hbar c^3 / 16 \pi^2 k G M$, où \hbar est la constante de Planck, c la vitesse de la lumière, k la constante de Boltzmann, G la constante de gravitation et M la masse du trou noir.

* Les approches Dilaton-Gauss-Bonnet sont des généralisations de la relativité d'Einstein dans lesquelles on autorise des termes supplémentaires dans l'équation qui décrit le système physique.

* Un GeV (gigaélectronvolt) représente une énergie un milliard de fois supérieure environ à celle de la lumière bleue, soit encore l'énergie de masse d'un proton.

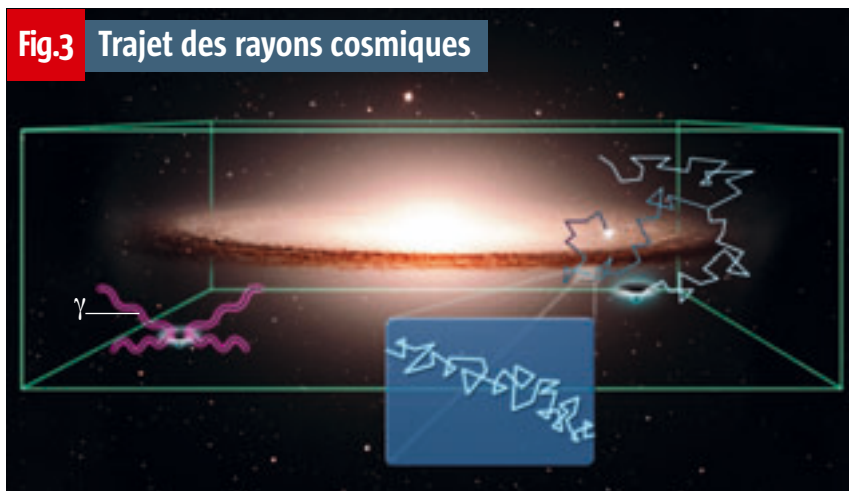
* Les pions sont des particules formées d'un quark et d'un antiquark.

[1] S.W. Hawking, *Comm. Math. Phys.*, 43, 199, 1975.

[2] J.H. MacGibbon, B. J. Carr, *Apl*, 371, 447, 1991.

[3] Dossier « Les sursauts gamma », *La Recherche*, 353, 2002.

Fig.3 Trajet des rayons cosmiques



LES RAYONS COSMIQUES SONT PIÉGÉS par le champ magnétique de la Voie lactée et de son halo. Contrairement aux rayons gamma (γ , en rose), qui se propagent en ligne droite, les rayons cosmiques émis par les trous noirs primordiaux (en bleu) ont des trajectoires erratiques du fait des nombreux processus d'interactions nucléaires, de réaccélération et d'éclatement que ces particules subissent. Il est alors très difficile de les distinguer des rayons cosmiques issus d'autres sources. © INFOGRAPHIES : CHRISTOPHE CHALIER

⇒ stellaire. Ces rayons cosmiques « habituels » sont abondants et composés d'électrons, de protons et de noyaux plus lourds, comme ceux de carbone ou de fer. Hélas, il est pratiquement impossible de déceler, au sein de ces nombreux corpuscules venant essentiellement d'explosions d'étoiles massives, une éventuelle composante ténue due à l'évaporation de trous noirs primordiaux [fig. 3].

... et des antiparticules

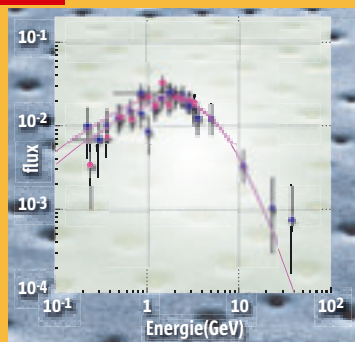
Beaucoup plus intéressante, en revanche, est l'étude des particules d'antimatière. Alors qu'elles sont naturellement très peu nombreuses, elles sont produites en quantité identique aux particules par les trous noirs en évaporation. Les antiprotons et les antideutrons (noyaux formés d'un antiproton et d'un antineutron) sont des sondes particulièrement adaptées à la recherche de trous noirs primordiaux : l'antimatière pourrait ainsi révéler les petits trous noirs, et donc l'état de l'Univers aux temps les plus reculés ! Ces noyaux ne sont pas émis directement : ce sont les quarks et antiquarks qui sont émis par les trous noirs suffisamment chauds, conformément à la théorie de Hawking. La modélisation de ces processus a été validée par les mesures obtenues auprès des grands accélérateurs de particules : ils constituent un très bel exemple de l'application des lois les plus élémentaires de la physique des hautes énergies à des objets astrophysiques ! La prise en compte rigoureuse des lois de la théorie des interactions fortes (ici, la chromodynamique quantique) dans ce cadre est essentiellement due à Jane Mac Gibbon,

étudiante de Bernard Carr à l'université de Cambridge (Grande-Bretagne), qui, au début des années quatre-vingt-dix, a considérablement modifié la vision que l'on avait alors du phénomène [4].

Des détecteurs placés dans des ballons stratosphériques ont d'ores et déjà mesuré avec une grande précision les flux d'antiprotons cosmiques. Les physiciens ont longtemps cru qu'une partie des antiprotons observés prouvait l'existence d'objets « exotiques » dans l'Univers et, au premier rang d'entre eux, les trous noirs primordiaux, parce qu'aucun processus classique ne permettait d'expliquer les mesures [fig. 4]. Des études plus raffinées ont hélas permis de comprendre les données d'observation, essentiellement en faisant intervenir des processus de perte d'énergie des particules [5]. Seule une limite supérieure ($2.10^{-33} \text{ g/cm}^3$) sur la densité de l'Univers en trous noirs microscopiques [6] a pu être obtenue. Celle-ci est complémentaire du résultat issu des rayons gamma, parce qu'elle correspond à une mesure locale, les rayons cosmiques chargés étant confinés dans notre galaxie par le champ magnétique, tandis que les photons peuvent provenir de toutes les régions de l'Univers, même les plus reculées. Cette limite supérieure confirme l'absence d'une quantité notable de petits trous noirs dans notre galaxie, la Voie lactée. Ces résultats sont aujourd'hui intensément débattus, notamment après l'hypothèse très controversée d'interactions qui se produiraient au voisinage immédiat de l'horizon des trous noirs primordiaux. Différents groupes s'opposent actuellement sur ce point, dont la modélisation complète est extrêmement délicate.

Alors, pas d'espoir de prouver l'existence des trous noirs primordiaux ? Bien au contraire ! Il y a d'autres pistes, en particulier les antideutrons. Aux basses énergies, ces noyaux ne peuvent pratiquement pas être créés dans le rayonnement cosmique par des processus conventionnels. Une fenêtre de détection semble ici s'ouvrir. Elle sera, dans une certaine mesure, accessible au spectromètre AMS, un détecteur de rayons cosmiques de très grande sensibilité mis en place sur la Station spatiale internationale en 2005 pour une durée de trois ans. Mais même en cas de détection positive, on ne pourra pas être

Fig.4 Flux d'antiprotons



LE FLUX D'ANTIPROTONS REÇU AU SOMMET DE L'ATMOSPHÈRE TERRESTRE A ÉTÉ CALCULÉ. La courbe basse correspond à des phénomènes purement conventionnels, et la courbe haute tient compte d'une distribution de trous noirs primordiaux (de densité fixée à $1,6.10^{-34} \text{ g/cm}^3$) dans la Galaxie. Les points correspondent aux données expérimentales et montrent qu'il n'est pas nécessaire de recourir à des phénomènes « exotiques » pour rendre compte des mesures.

certain de l'existence des trous noirs primordiaux. La difficulté majeure est que d'autres sources « inhabituelles » peuvent donner un signal de même type. Parmi celles-ci, se trouvent des particules lourdes que les physiciens traquent, sans succès, depuis des années et qui pourraient constituer l'essentiel de la masse de notre Univers : les neutralinos. Ce ne sera donc pas suffisant. Le détecteur spatial Pamela, qui sera mis en orbite sur le satellite russe Resurs-DK1 cette année, devrait lui aussi donner très prochainement de nouvelles mesures de grande précision, en particulier en donnant accès aux très basses énergies. Parallèlement, les ballons stratosphériques continuent d'effectuer des mesures, et une véritable course est engagée. Depuis quelques mois, l'expérience américaine HEAT, un détecteur embarqué sur un ballon en haute altitude, a mis en évidence un très léger excès de positons, c'est-à-dire d'antiélectrons, par rapport aux prévisions des modèles standard de rayonnement cosmique. Les spéculations sur un signe d'une « nouvelle physique » vont bon train. Mais l'histoire montre qu'une mesure plus précise et une meilleure compréhension des modèles conventionnels ont de très bonnes chances de balayer cet indice.

Mais, même si les trous noirs primordiaux demeuraient hors d'atteinte, leur absence serait elle-même très riche d'informations. Cela montrerait que les fluctuations de densité ont été faibles pendant les tout premiers temps de l'Univers. Cela permettrait aussi d'ajuster les paramètres de différents scénarios (parfois même d'en exclure certains), dans lesquels des transitions de phase induiraient nécessairement une production notable de petits trous noirs.



DANS LE FUTUR ACCÉLÉRATEUR DE PARTICULES LHC, les collisions de protons à haute énergie (de l'ordre de 10 000 GeV) pourraient créer des petits trous noirs en évaporation. Cela suppose que, en accord avec certaines prédictions théoriques non encore vérifiées, notre monde dispose d'un grand nombre de dimensions supplémentaires de taille respectable.

© CERN



LA STATION SPATIALE INTERNATIONALE accueillera en 2005 l'expérience AMS. Elle devrait permettre de mesurer le rayonnement cosmique avec une précision inégalée. Cela ouvrira de nouvelles perspectives dans la recherche de trous noirs primordiaux, mais aussi dans la compréhension des processus galactiques, la recherche d'antimatière et la traque de la matière noire. © ESA-D. DUCROS

Et si, sauf bonne surprise, on ne trouve pas ces trous noirs primordiaux dans l'espace, il restera à les détecter... sur la Terre. En effet, de petits trous noirs pourraient apparaître lors d'expériences effectuées dans les accélérateurs de particules. Selon les descriptions unifiées de la physique, qui considèrent un nombre de dimensions de l'Univers suffisamment élevé (typiquement 10 ou 11), des mini-trous noirs pourraient se former lors des chocs d'environ 10 000 GeV entre particules [7]. C'est la gamme d'énergie du grand collisionneur de hadrons, LHC, actuellement en construction au CERN (Suisse), qui pourrait ainsi ouvrir cette nouvelle voie d'investigation à partir de 2007. De tels trous noirs étant très légers, ils s'évaporerait presque instantanément par le processus de Hawking. Comme les scénarios catastrophes où la Terre finirait ainsi « absorbée » par ces mini-trous noirs ne sont pas viables [8], ces milieux de conditions extrêmes permettraient de tester enfin les effets de gravitation quantique, cette théorie unifiant relativité et physique quantique qui reste toujours à construire. L'étude du rayonnement de fin de vie de ces astres encore hypothétiques donnerait directement accès au nombre de dimensions supplémentaires de l'Univers et aux échelles caractéristiques qui leur sont associées : la structure profonde de notre espace-temps pourrait alors se révéler. ■ **A. B. et G. B.**

POUR EN SAVOIR PLUS

- F. Halzen *et al.*, *Nature*, 353, 807, 1991.
- M.Y. Khlopov, *Cosmoparticle Physics*, World Scientific, 1999.
- M. Begelman, M. Rees, *Gravity's Fatal Attraction*, Scientific American Library, 1995.
- K.S. Thorne, *Trous noirs et distorsions du temps*, Flammarion, 1997.

[4] J.H. MacGibbon, B. R. Webber, *Phys. Rev. D*, 31, 3052, 1990.

[5] F. Donato *et al.*, *ApJ*, 563, 172, 2001.

[6] A. Barrau *et al.*, *A&A*, 388, 676, 2002.

[7] S.B. Giddings, S. Thomas, *Phys. Rev. D*, 65, 056010, 2001.

[8] S.L. Glashow, R. Wilson, *La Recherche*, 329, 20, 2000.